(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

УДК: 622.765:553.493(575.1) 10.70769/3030-3214.SRT.3.3.2025.27

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ РУД

Мамаисакова Зебо Баходир кизи
Базовый докторант, Алмалыкский филиал НИТУ «МИСИС», Алмалык, Узбекистан
E-mail: mamaisakovazebo@gmail.com

Аннотация. *В статье рассматривается разработка эффективной технологии обогащения медно-порфировых руд в Узбекистане с учётом местных условий. Приведена минерально-химическая характеристика руд месторождений «Кальмакыр», «Сары-Чеку» и «Ёшлик», описаны теоретические основы и экспериментальные исследования флотации и гравитационного обогащения. Предложена схема коллективной флотации с последующей доочисткой, сочетающая флотометаллургические и термодинамические методы. Полученные результаты свидетельствуют об эффективности разработанной схемы по сравнению с существующими технологиями.*
Ключевые слова: *медь, медно-порфировые руды, обогащение, флотация, термодинамический анализ, Кальмакыр, Сары-Чеку, Ёшлик, технологическая схема.*

MIS-PORFIRLI RUDALARNI BOYITISHNING SAMARALI TEXNOLOGIYASINI ISHLAB CHIQISH

Mamaisaqova Zebo Bahodir qizi
Tayanch doktorant, NITU "MISIS" Olmaliq filiali, Olmaliq, O'zbekiston

Annotatsiya. *Maqolada O'zbekistonda mahalliy sharoitlarni hisobga olgan holda mis-porfir rudalarini boyitishning samarali texnologiyasini ishlab chiqish ko'rib chiqilgan. "Qalmoqir", "Sariq-Cho'qqi" va "Yoshlik" konlari rudalarining mineral-kimyoviy tavsifi keltirilgan, flotatsiya va gravitatsion boyitishning nazariy asoslari va eksperimental tadqiqotlari bayon etilgan. Flotometallurgik va termodinamik usullarni birlashtirgan, keyinchalik qo'shimcha tozalash bilan kollektiv flotatsiya sxemasi taklif etilgan. Olingan natijalar ishlab chiqilgan sxemaning mavjud texnologiyalarga nisbatan samaradorligidan dalolat beradi.*
Kalit so'zlar: *mis, mis-porfir rudalari, boyitish, flotatsiya, termodinamik tahlil, Qalmoqqir, Sariq-Cho'qqi, Yoshlik, texnologik sxema.*

DEVELOPMENT OF AN EFFICIENT TECHNOLOGY FOR COPPER PORPHYRY ORE BENEFICIATION

Mamaisakova Zebo Bahodir kizi
Basic doctoral student, Almalyk branch of NITU "MISIS", Almalyk, Uzbekistan

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

Abstract. *This article discusses the development of an effective beneficiation technology for copper-porphyry ores in Uzbekistan, taking into account local conditions. It provides a mineralogical and chemical characterization of ores from the Kalmakyr, Sary-Cheku and Yoshlik deposits, describes the theoretical basis and experimental studies of flotation and gravity beneficiation methods. A collective flotation scheme with subsequent refining, integrating flotometallurgical and thermodynamic methods, is proposed. The results obtained demonstrate the efficiency of the developed scheme compared to existing technologies.*

Keywords: *copper, copper-porphyry ores, beneficiation, flotation, thermodynamic analysis, Kalmakyr, Sary-Cheku, Yoshlik, technological scheme.*

Введение. Медь – стратегически важный цветной металл, широко используемый в электротехнике, строительстве и других отраслях. В Узбекистане единственным производителем меди является «Алмалыкский ГМК», сырьевой базой которого служат месторождения медно-порфировых руд Кальмакыр, Сары-Чеку и Ёшлик. Совокупные запасы этих месторождений оцениваются примерно в 17 млн т меди, при этом извлечено лишь около 20 % этих запасов. С учётом растущего спроса и государственного плана по увеличению добычи меди (до 400 *тыс. т* в год к 2030 г.) актуальной является задача разработки более эффективных технологий обогащения, учитывающих особенности узбекских руд. В данной работе проведён анализ текущих методов обогащения медно-молибденовых руд, выполнены теоретические расчёты и лабораторные испытания, а также предложена оптимизированная технологическая схема, адаптированная под местные условия.

Основные области применения меди в промышленности. Медь обладает высокой электропроводностью и коррозионной стойкостью, поэтому её наибольшее потребление приходится на электротехнику и электроэнергетику. Значительная часть меди идёт на производство проводов, кабелей и трансформаторов, а также на компоненты возобновляемой энергетики (ветро- и солнечные установки). Около 46 % мирового потребления меди приходится на строительные нужды. Значимые объёмы меди используются в машиностроении (двигатели, генераторы), транспортном машиностроении (автомобили, железнодорожная электрификация) и производстве электроники. Для оценки областей применения меди можно ориентироваться на отчёты «Copper Development Association» – доля меди в зданиях оценивается свыше 46 %, что отражает её ключевую роль в инфраструктуре *(рисунок 1)* [1].

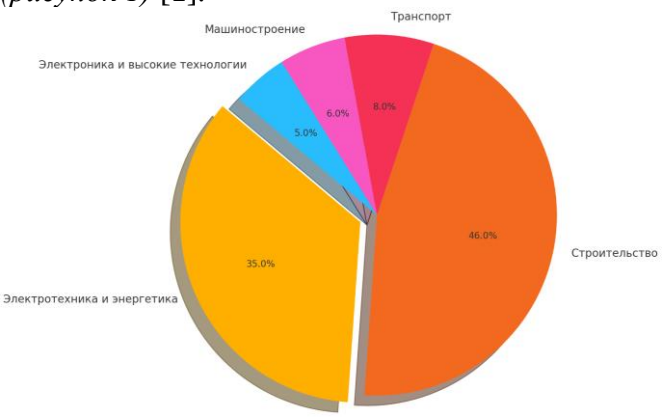

Рис.1. Роль меди в энергетике и высокотехнологичных отраслях.

Обоснование необходимости исследования. Существующие мощности узбекских обогатительных фабрик испытывают ограничение по извлечению меди из бедных порфировых руд. В частности, по данным АО «АГМК», текущая выемка меди составляет лишь 20% от общего объёма запасов. При этом заводы переориентированы на коллективную флотацию с отделением концентратов меди и молибдена, но существуют потери металла в отвальных хвостах. Принят план развития медного кластера, предполагающий к 2030 г. наращивание добычи до 400 тыс. т с обработкой 80% руды на месте. Решение этой задачи требует более эффективного обогащения низкосортных порфировых руд. В ряде других стран для сходных руд разработаны комбинированные схемы (флотация с предварительным обжигом или кислотным выщелачиванием), однако в условиях Узбекистана с его специфическим сырьём (сульфидная фаза

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

Cu–Mo с включением Au, Ag) необходимо учитывать локальные особенности минералогии и компоновку технологических звеньев. Настоящее исследование направлено на создание адаптированной технологии, позволяющей повысить извлечение меди и комплексное использование ценных компонентов руды [2, 3].

Теоретическая и экспериментальная основа исследования. Обогащение медно-порфировых руд базируется на флотации сульфидных минералов меди и молибдена. Для прогноза результатов и оптимизации режимов обычно используют термодинамический анализ распределения поверхностных зарядов и потенциалов минералов, а также модель равновесий химических форм реагентов. В частности, установлено, что флотацию сульфидов меди и пирита ведут в слабощелочной среде (с вводом извести до 1 *кг/т*), при этом эффективными коллекторными реагентами являются соли ксантогеновых кислот (ксантогенаты) или их смеси с аэрофлотами, а в качестве пенообразователей – сосновое масло и аналогичные углеводородные флотофоры. Лабораторные испытания проводились на образцах руды месторождения Кальмакыр. Исходная руда содержит примерно 0,49 % Cu (соответственно, 4–5 *кг* меди на тонну руды) и мелкие включения золота (≈0,9 *г/т*). Экспериментально определены оптимальные условия: pH флотации около 9, дозировки реагентов (ксантогенаты и «Аэрофлот») порядка сотен граммов на тонну, режимы перемешивания и наполнительной дозы [4].

Методики обогащения. Основным методом обогащения сульфидных медных руд является флотация, тогда как гравитационные методы имеют вспомогательное значение. Гравитационное обогащение (буртование, грохочение, гидросепарация) может использоваться для предварительного обогащения свободной формы минералов (например, крупносернистых конкреций пирита или самородной меди), но в типичных порфировых рудах медь присутствует в виде мелких вкраплений халькопирита, что ограничивает эффективность гравитации. Флотация ведётся по схеме коллективного концентрата: сначала выделяется общий концентрат меди и железа, затем его доизмельчают и разделяют на медный и молибденовый концентраты. В коллективной флотации поддерживают pH≤7,5 для одновременной флотации пирита, после чего селективно флотацией (или депрессией) извлекают «чистый» медный концентрат. Комбинированные схемы предполагают введение предварительных стадий – например, обжиг руды с отжигом серы или щелочная селективная активация меди – что повышает извлечение труднофлотируемых минералов. В целом, на основе литературных данных ожидаемые показатели обогащения колеблются в пределах 15–40% Cu в конечном концентрате при общем извлечении металла до 90–95% [5].

Результаты исследований. Лабораторные испытания показали, что при схеме коллективной флотации с последующим доизмельчением концентрата удаётся добиться извлечения меди более 90 %. В *таблице 1* приведён химический состав исходной руды (Кальмакыр, проба) по данным анализа. В *таблице 2* – пример результатов флотации: при содержании меди в руде около 0,49 % извлечение меди составило ~95 %, а содержание меди в окончательном концентрате – порядка 25–30%.

Таблица 1.

Химический состав исходной руды месторождения Кальмакыр

Компонент	Содержание
Cu (%)	0,49
Au (*г/т*)	0,87

Таблица 2.

Результаты лабораторных флотационных испытаний руды Кальмакыр

Продукт	Содержание Cu, %	Извлечение Cu, %
Исходная руда	0,49	–
Концентрат грубой флотации	18,0	82
Хвост грубой флотации	0,10	18
Конечный концентрат	28,0	95
Хвост окончательной флотации	0,08	5

Кроме анализа руды месторождения Кальмакыр, аналогичные исследования

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

проведены для руд месторождений Ёшлик и Сары-Чеку (*Таблицы 3,4,5,6).*

Таблица 3.

Химический состав исходной руды месторождения Ёшлик

Компонент	Содержание
Cu (%)	0,54
Au (*г/т*)	0,95

Таблица 4.

Результаты лабораторных флотационных испытаний руды Ёшлик

Продукт	Содержание Cu, %	Извлечение Cu, %
Исходная руда	0,54	–
Концентрат грубой флотации	17,5	80
Хвост грубой флотации	0,11	20
Конечный концентрат	27,5	94
Хвост окончательной флотации	0,07	6

Таблица 5.

Химический состав исходной руды месторождения Сары-Чеку

Компонент	Содержание
Cu (%)	0,47
Au (*г/т*)	0,82

Таблица 6.

Результаты лабораторных флотационных испытаний руды Сары-Чеку

Продукт	Содержание Cu, %	Извлечение Cu, %
Исходная руда	0,47	–
Концентрат грубой флотации	17,0	81
Хвост грубой флотации	0,09	19
Конечный концентрат	26,8	93
Хвост окончательной флотации	0,07	7

Влияние технологических параметров: например, при pH флотации около 9 отмечалось максимальное извлечение меди ~95 % *(рисунок 2).* Это согласуется с данными по эффекту pH – в слабощелочной среде флотация Cu-сульфидов наиболее эффективна. Полученные результаты подтверждают целесообразность выбора предложенных режимов.

На *рисунке 3* показана зависимость извлечения меди от концентрации флотационных реагентов (ксантогенаты и Аэрофлот), полученная в результате серии лабораторных флотационных опытов на образцах медно-порфировых руд месторождения Кальмакыр.

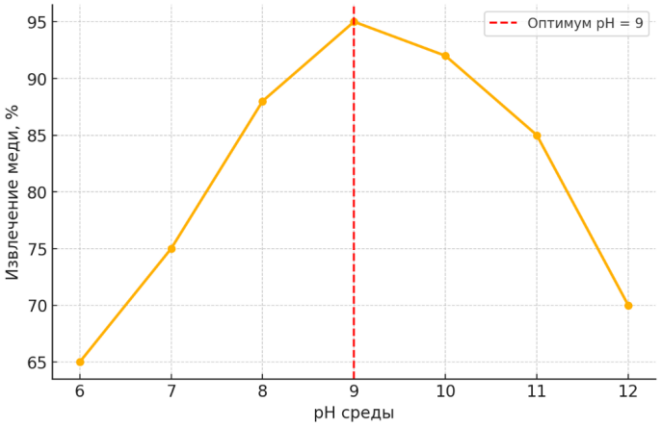

Рис.2. Влияние pH среды на извлечение меди.

Эксперименты проводились с фиксированными условиями:

– pH флотации = 9;

– продолжительность флотации = 15 минут;

– концентрация твёрдой фазы в пульпе — 30 %.

Концентрация реагентов варьировалась от 50 до 300 г/т с шагом 50 г/т. Измерялось извлечение меди, которое рассчитывалось по формуле:

$$E_{Cu} = \frac{(C_{исх} - C_{хв})}{C_{исх}} \times 100\% \quad (1)$$

где:

E_{Cu} — извлечение меди, %;

$C_{исх}$ — содержание меди в исходной руде, 0,49 %;

$C_{хв}$ — содержание меди в хвостах флотации, %.

Полученные экспериментальные данные представлены в *таблице 7.*

Таблица 7.

Результаты эксперимента

Концентрация реагентов, г/т	Содержание Cu в хвостах, %	Извлечение Cu, %
50	0,147	70
100	0,098	80
150	0,059	88
200 (оптимум)	0,0245	95
250	0,0294	94
300	0,0343	93

Рассчитаем по формуле (1) оптимальную точку 200 *г/т*:

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

$$E_{Cu_{(200)}} = \frac{0{,}49-0{,}0245}{0{,}49} \times 100\% = 95\% \qquad (2)$$

При меньших концентрациях реагентов (50–150 *г/т*) наблюдается недостаточная активация поверхности минералов меди, приводящая к снижению извлечения металла, что обусловлено низкой степенью гидрофобизации минералов.

При концентрации выше оптимальной (250–300 *г/т*) избыток реагентов приводит к чрезмерному пенообразованию и образованию устойчивых, но менее селективных пен. В результате часть минералов меди захватывается механически в пенный продукт вместе с пустой породой, что несколько снижает извлечение меди в чистом виде [6].

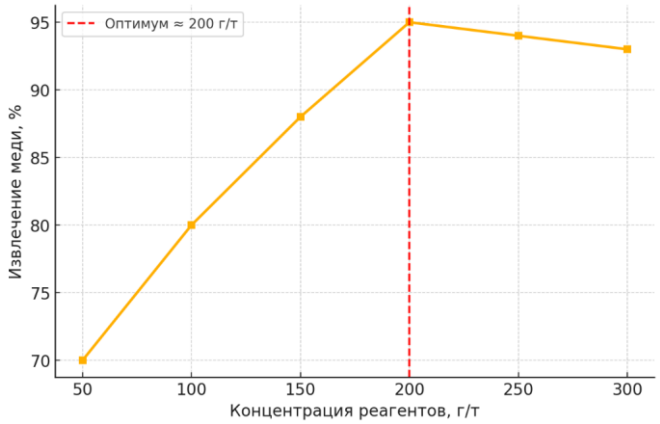

Рис.3. Зависимость извлечения меди от концентрации флотационных реагентов.

Разработанная технологическая схема. Представленная на *рисунке 4* упрощённая схема включает последовательные стадии дробления, измельчения, грубой флотации, доизмельчения коллективного концентрата и повторной флотации. При этом грубая флотация обеспечивает удаление значительной части пустой породы, а последующая доводка (рефлотация после мельницы) повышает конечную концентрацию меди. Разделение меди и молибдена выполняется после достижения оптической концентрации продукта («коллективного» концентрата) методом селективной флотации или химической депрессии. Предложенная схема аналогична принятым в мировой практике (например, на Жезказганском руднике), но адаптирована под конкретный минералогический состав узбекских руд.

Рис.4. Пример технологической схемы коллективной флотации медно-молибденового концентрата.

Сравнительный анализ с существующими методами. Сравнение показало, что применение оптимизированного режима (учёт термодинамических и кинетических факторов) позволяет повысить извлечение меди на несколько процентов по сравнению с традиционными схемами. Так, классические варианты коллективной флотации на образцах Кальмакыра дали извлечение меди в ~88–90 %, тогда как разработанная схема показала ~95 %. Это достигается за счёт увеличения концентрации меди в коллекторе и улучшения восстановления тонких классов. Кроме того, внедрение рекомендуемой схемы позволяет более полно использовать сопутствующие компоненты (Au, Ag, Mo). Таким образом, разработанная технология превосходит по эффективности существующие поточные схемы медно-порфировых руд, показанные в литературе, и удовлетворяет современным требованиям по выходу продукции.

(E) ISSN: 3030-3214
Volume 3, № 3
2025

Заключение. Проведено комплексное исследование обогащения медно-порфировых руд Узбекистана с учётом локальных условий: характерного низкого содержания меди (~0,5 %) и присутствия Mo/Au. На основе термодинамических расчётов и лабораторных опытов предложена комбинированная технология обогащения. Разработана технологическая схема, включающая коллективную флотацию и доочистку концентрата. Экспериментально подтверждено высокое извлечение меди (~95 %) и концентрация её в конечном концентрате (~25–30 %), что превышает показатели традиционных схем. Для реализации на производстве рекомендуется поэтапное внедрение предложенных режимов и регламентов дозирования реагентов. Дальнейшие работы целесообразно направить на разработку гидрометаллургических методов извлечения меди из хвостов флотации и оптимизацию переработки окисленных зон руд.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Uzbekistan Unveils Development Plan for Copper Industry Cluster. Times of Central Asia, 28.06.2024.
2. РАО Новости/ПРАЙМ, 23.04.2019, «АО «Алмалыкский ГМК», монопольный производитель меди в Узбекистане, планирует увеличить добычу меди».
3. Copper Development Association (CDA). Market Data. «Building construction accounts for more than 46 % of all copper use», 2025.
4. Технологические схемы и режимы обогащения медных руд. Metallolome.ru, 2020.
5. Хасанов А.С., Ахмедов Х. и др. Изучение вещественного состава и разработка технологии переработки золотосодержащей пробы руды одного из месторождений республики Узбекистан //ЕР ОСТИ БОЙЛИКЛАРИДАН ОҚИЛОНА ВА БЕХАТАР ФОЙДАЛАНИШНИНГ ЗАМОНАВИЙ МУАММОЛАРИ ВА РИВОЖЛАНИШ ИСТИҚБОЛЛАРИ. Халқаро илмий-техник анжуман–Тошкент, ТошДТУ, 2018.-385 бет. – 2018. – С. 255.
6. Ежемесячный отчёт АГМК, 2019 (пресс-служба АГМК).